

УДК 621.372

Е.Б. Ткачева¹, Исаам Саад¹, Мохаммед Джаамал Салим²¹ Харьковський національний університет радіоелектроніки, Харків² Одеська національна академія зв'язи імені А.С. Попова, Одеса

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА МАСШТАБИРУЕМОСТИ УРОВНЯ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЕЙ, ПОСТРОЕННЫХ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ SDN

В статье рассмотрены особенности сетевой архитектуры, построенной на основе концепции Software-Defined Networking. Определены основные характеристики уровня управления, которые влияют на эффективность функционирования всей сети в целом. Предложена метрика оценки масштабируемости уровня управления, а также приведено изменение коэффициента масштабируемости трех основных структур уровня управления Software-Defined Networking: централизованной, децентрализованной, иерархической. По предложенным формализмам произведена оценка времени отклика для разных типов контроллеров, а также масштабируемость разных типов структур.

Ключевые слова: Software-Defined Networking, масштабируемость, уровень управления, время отклика, контроллер.

Введение

Программно-конфигурируемые сети (Software-Defined Networking, SDN) представляют собой новый подход к проектированию, построению и использованию инфокоммуникационных систем [1]. Уровень управления в соответствии с концепцией SDN отделен от уровня передачи данных и логически централизован в отдельном устройстве - контроллере, который обеспечивает мониторинг и управление сетевыми ресурсами. Основные преимуществами SDN - это гибкая и быстрая адаптация сетевых ресурсов под требования приложений и сервисов, возможность удаленного администрирования, а также уменьшение загрузки сети.

Однако применение механизмов централизованного управления сталкивается с рядом проблем: количество обработанных запросов, а следовательно, и качество предоставляемых сервисов, существенно зависят от масштабируемости уровня управления SDN. Контроллер является ключевым «критическим» элементом, от которого зависит эффективность функционирования крупных сетей и сетей с большим количеством потоков. Например, один из самых распространенных контроллеров SDN (NOX контроллер) [1], может обрабатывать около 30 000 запросов в секунду при этом время отклика находится в пределах 10 мс.

В рамках решения задачи эффективного функционирования SDN сетей в первую очередь должны быть оценены такие характеристики, как производительность и масштабируемость. Данные характеристики зависят от количества управляемых коммутаторов и их связности с контроллерами, интенсивности поступающих запросов и их природы, а также времени обработки запросов контроллером. Следовательно, эффективность функционирования

SDN сетей зависит от адаптации контроллеров к увеличению интенсивности запросов, поступающих от коммутаторов и возможности обеспечения надлежащего качества обслуживания при увеличении масштабов сети.

Таким образом, оценка масштабируемости сети, построенной на основе концепции SDN, является актуальной задачей при проектировании новой или расширении существующей сетевой архитектуры.

Целью данной статьи является анализ различных типов структуры уровня управления, формирование метрики, относительно которой производится оценка масштабируемости уровня управления, а также расчет изменения коэффициента масштабируемости для разных структур.

Также в рамках поставленной задачи выполнен расчет времени отклика разных типов контроллеров при увеличении количества сетевых устройств.

1. Обзор архитектуры уровня управления

Контроллер, как централизованный элемент управления, охватывает множество функций [2]. Основными из них являются: управление сетевыми элементами, ресурсами и приложениями, построение топологии сети и постоянный мониторинг ее состояния, обработка и распределение передаваемых данных.

Изначально архитектура уровня управления предусматривала наличие всего одного контроллера. Но с возрастанием масштабов сети появилась необходимость внесения изменений в существующую архитектуру. Повысить масштабируемость уровня управления позволило введение дополнительных контроллеров, а также изменение структуры уровня управления - формирование децентрализованной и иерархической структуры уровня управления. Ре-

шения HiperFlow [3] и Onix [4], приведенные на рис. 1, а, имеют децентрализованную структуру – все контроллеры имеют равноценные права и функции. Решение Kandoo, которое приведено на рис. 1, б, представляет собой структуру, состоящую из двух классов контроллеров: корневой контроллер и локальный контроллер. Локальные контроллеры имеют ограниченный функционал и не содержат информации о всей топологии сети (управляют несколькими OpenFlow коммутаторами).

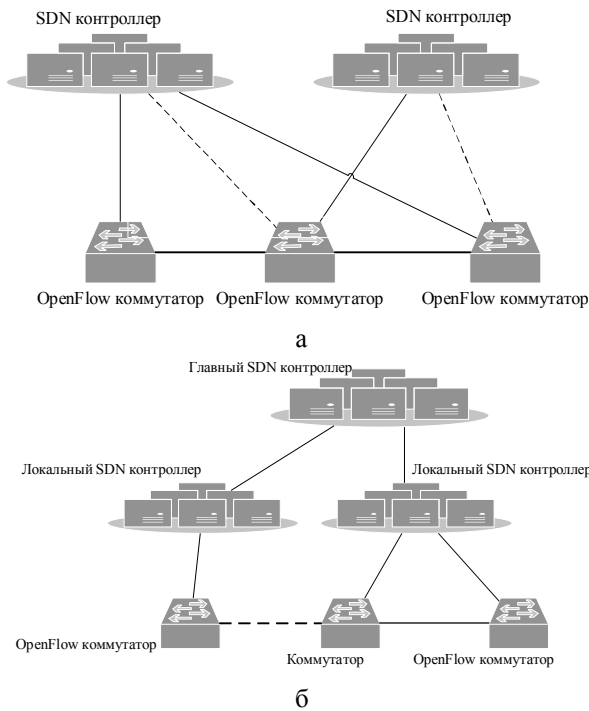


Рис. 1. Структура уровня управления: а – HiperFlow и Onix, б – Kandoo

В соответствии с существующими стандартами и предложениями [1, 5] можно выделить определенный набор запросов, которые обрабатываются на уровне управления SDN: мониторинг и оценка состояний сети, восстановление после сбоя, обновление сетевой конфигурации. При добавлении новых сетевых элементов начальной фазой всегда выступает процесс инициализации и обновления информации об общей топологии сети.

Наибольшее влияние на производительность контроллеров SDN, а следовательно, и масштабируемость уровня управления SDN оказывают запросы мониторинга и оценки состояний сети.

На рис. 2 приведен процесс формирования нового потока управления для фрагмента сети, которая состоит из N узлов. Пусть величина $Tf_{x,y}$ представляет собой интервал времени обработки последовательных запросов от одного OpenFlow коммутатора (x – пользователь А) к другому (y – пользователь В). В соответствии с концепцией SDN, к контроллеру направляются только те пакеты, информа-

ция о которых отсутствует в записях таблицы пересылки FlowTable (1). При этом коммутатор генерирует и направляет запрос контроллеру (2). Контроллер формирует новую запись для пакета, устанавливает правила последующей обработки (3) и направляет ответ коммутатору (4).



Рис. 2. Формирование управляющего потока в SDN

Интервал времени двух последовательных событий (запроса от OpenFlow коммутатора (x) и ответа контроллера (c)) характеризуется величиной $T_{c,x}$. Отсчет времени обработки устанавливается с момента передачи первого запроса (x). Предполагается, что величины x и c зависят от производительности контроллера, при этом каждый новый запрос можно представить в виде случайной величины, распределенной по экспоненциальному закону распределения со средним значением λ . А величины $Tf_{x,y}$ и $T_{c,x}$ подчиняются закону распределения Пуассона. При этом каждый контроллер может быть смоделирована цепью Маркова M/M/1.

Контроллер является «узким местом» уровня управления. Особое внимание при оценке масштабируемости и производительности сети необходимо уделить расчету времени обработки запросов, которое зависит от топологии сети, алгоритмов маршрутизации и вычислительной мощности контроллера.

Как было отмечено ранее, в зависимости от связности контроллеров структура уровня управления может быть условно разделена на три типа: централизованная, децентрализованная и иерархическая [4]. Так, централизованная структура уровня управления имеет только один контроллер. Децентрализованная и иерархическая структуры имеют несколько контроллеров. В децентрализованной структуре контроллеры выполняют равноценные функции и связи между ними равноценны. В иерархической структуре наблюдается распределение функциональных обязанностей между контроллерами. Масштабируемость уровня управления зависит от типа используемой структуры.

2. Оценка масштабируемости уровня управления SDN

Уровень управления SDN по своей природе относится к распределенным системам. Для количественной оценки масштабируемости уровня управления SDN может быть использована следующая метрика, базирующая на оценке производительности сети [6]:

$$P(N) = \varphi(N) \frac{E\{T(N)\}}{C(N)}, \quad (1)$$

где N - количество сетевых узлов, $\varphi(N)$ - пропускная способность уровня управления при обработке сетевых запросов, $E\{T(N)\}$ - усредненное время обработки каждого запроса, $C(N)$ - общее количество обработанных сетевых запросов от N - узлов.

При увеличении количества сетевых элементов от N_1 до N_2 масштабируемость может быть задана следующим отношением:

$$M(N_1, N_2) = \frac{P(N_1)}{P(N_2)}, \quad (2)$$

где $P(N_1)$ - производительность уровня управления при обработке запросов от N_1 сетевых элементов, $P(N_2)$ - производительность уровня управления при обработке запросов от N_2 сетевых элементов.

Масштабируемость уровня управления SDN в зависимости от типа структуры может быть представлена следующим образом:

- **централизованная архитектура.** Для централизованной структуры характерно прибытие запросов от коммутаторов на один общий контроллер, которое подчиняется Пуассоновскому закону распределения. Средняя частота запросов составляет $\lambda_C = N(N-1)\lambda$.

Время обработки запросов контроллером обратно-пропорционально количеству сетевых элементов: $\mu_C = C/g(N)$. Среднее время отклика на запрос может быть задано как:

$$E\{T_C(N)\} = \frac{1}{\mu_C - \lambda_C}, \quad (3)$$

- **децентрализованная структура.** Децентрализованная структура уровня управления состоит из нескольких контроллеров m . Каждый контроллер отвечает за отдельный фрагмент сети. Взаимосвязи для каждого контроллера могут представлены двумя типами: глобальные – связь между контроллерами разных фрагментов сети, локальные – связь с коммутаторами фрагмента сети. В данном случае масштабируемость сети зависит от типа взаимосвязи. Примером может служить получение запроса от внешнего «глобального» сетевого элемента. В данном случае запрос разделяется на два однотипных: глобальный – направленный к соседним кон-

троллерам и локальный – направленный к элементам фрагмента сети.

Если для централизованной структуры количество запросов для N сетевых элементов представлено как $N(N-1)$, то для децентрализованной множество запросов будет разделено на $N/m - N$ локальных запросов и $N^2 - N^2/m$ глобальных запросов. При этом, каждый контроллер управляет по меньшей мере $N/m + (m-1)$ узлами. Среднее время обработки для каждого контроллера может быть задано как $\mu_m = C/(g(N/m + m-1))$

А среднее время обработки запроса каждым контроллером может быть представлено следующим соотношением:

$$E\{T_d(N)\} = \frac{1 + \frac{N(m-1)}{(N-1)m} d_m}{\mu - \lambda}, \quad (4)$$

где m – количество взаимосвязанных сетевых элементов (контроллеров), d_m – количество связей между контроллерами m .

- **иерархическая структура.** При использовании иерархической структуры каждый контроллер может быть отнесен к одному из двух типов: головной контроллер (root controller) и периферийный контроллер (leaf controller). Взаимосвязь между ними может быть представлена как и для децентрализованной структуры в виде локальных и глобальных связей.

Связность контроллеров в иерархической структуре задается следующим уравнением:

$$D_{x,y}(i,j) = \begin{cases} 1, d_{i,j} \in C_{x,y}; \\ 0, d_{i,j} \notin C_{x,y}, \end{cases}$$

где $d_{i,j}$ – позиция i -го контроллера на j -м уровне иерархии, $C_{x,y}$ – множество контроллеров, которые могут принимать участие в обработке запроса от узла x к узлу y . В общем случае производительность контроллеров подобной структуры может быть задана следующим уравнением:

$$\begin{aligned} E\{T_h(N)\} &= \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N E(T_{c_{x,y}})}{N(N-1)} = \\ &= \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N E(T_{f_{x,y}}) C_{x,y}(1,1)}{N(N-1)} = \\ &= \frac{N - \frac{N}{m_h}}{N-1} \frac{1}{\mu_{h,r} - \lambda_{h,r}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, зная $E\{T_C(N)\}$, $E\{T_d(N)\}$, $E\{T_h(N)\}$ и максимальную производительность

контроллеров $C(N)$, можно рассчитать значения масштабируемости для каждого типа структуры уровня управления:

$$M_c(N_1, N_2) = \frac{C(N_1) - N_1^2 \lambda}{C(N_2) - N_2^2 \lambda}; \quad (6)$$

$$M_d(N_1, N_2) = \frac{C_d(N_1 - 1) - N_1^2 \lambda}{C_d(N_2 - 1) - N_2^2 \lambda}; \quad (7)$$

$$M_h(N_1, N_2) = \frac{C_h(N_1 - 1) - N_1^2 (N_1 m_h - 1) \lambda}{C_h(N_2 - 1) - N_2^2 (N_2 m_h - 1) \lambda}. \quad (8)$$

На рис. 3 и 4 приведены графики сравнения коэффициентов масштабируемости в случае применения различных типов контроллеров: NOX и FloodLight (время задержки 5 мс и 7,5 мс соответственно), и графики сравнения для разных типов связности контроллеров.

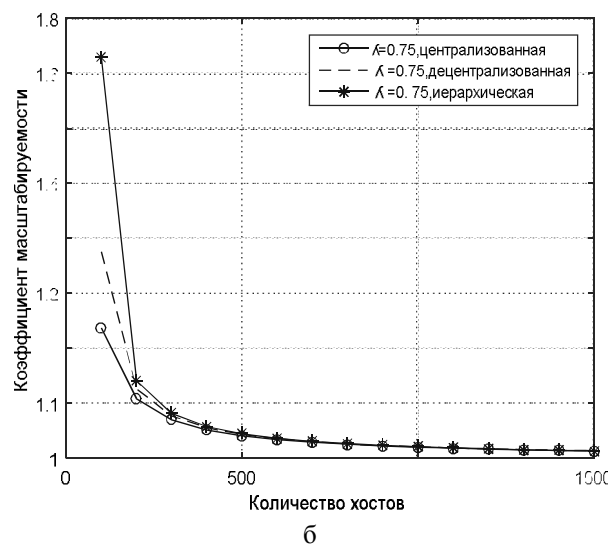
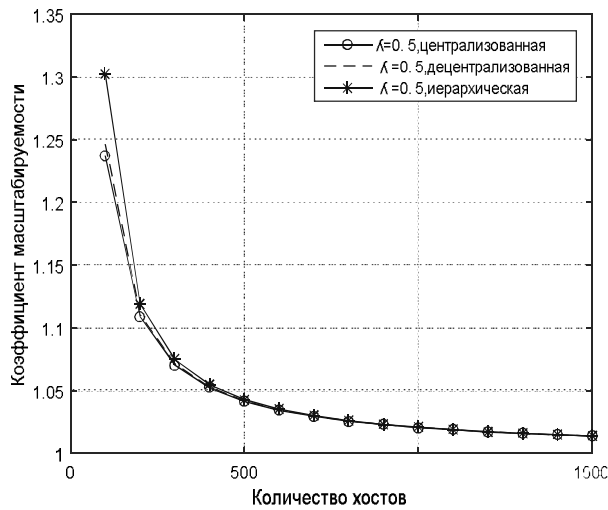


Рис. 3. Сравнение коэффициента масштабируемости для контроллеров с различной производительностью: а – NOX, б – FloodLight

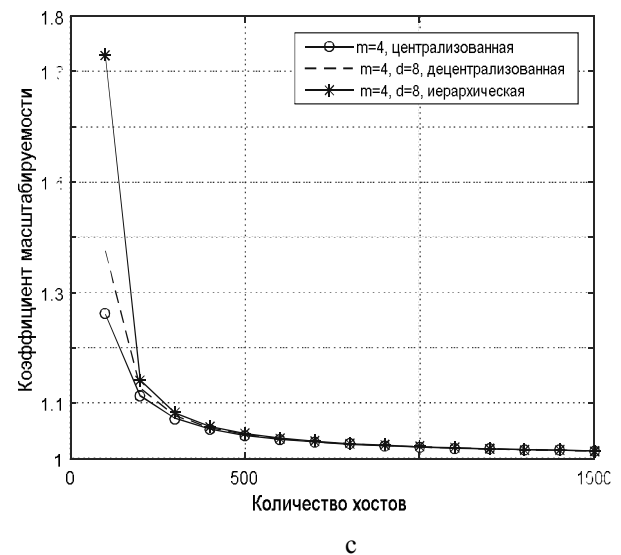
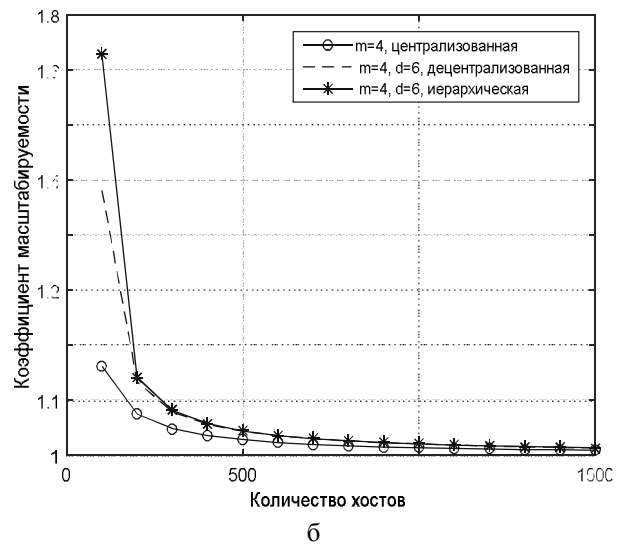
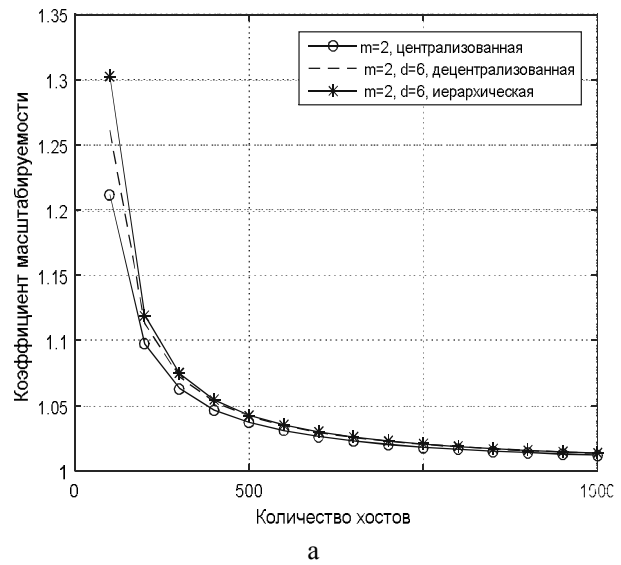


Рис. 4. Сравнение коэффициента масштабируемости для различных структур: централизованной, децентрализованной, иерархической (контроллер NOX) а – $m = 2, d = 6$; б – $m = 4, d = 6$ и с – $m = 4, d = 8$

Ісходя из полученных результатов видно, что тип структуры уровня управления значительно влияет на масштабируемость всей сети в целом.

Так, масштабируемость иерархической структуры уровня управления SDN в случае связности элементов (d) шесть и более значительно превышает масштабируемость децентрализованной структуры. Централизованная структура имеет наихудший коэффициент масштабируемости.

При количестве сетевых элементов более 1000 коэффициент масштабируемости уровня управления любой структуры стремительно уменьшается.

Выводы

Архитектура уровня управления SDN имеет ряд особенностей: обработка всех запросов от уровня передачи данных ведется единым сетевым элементом – контроллером; интервалы времени между запросами являются независимыми величинами.

В уравнениях 1 и 2 приведена метрика, которая позволяет оценить масштабируемость уровня управления SDN исходя из количества сетевых элементов и характеристик контроллера.

В зависимости от количества контроллеров и их связности рассмотрено три типа структуры уровня управления.

На основании полученных результатов (формулы 6-8) произведена оценка масштабируемости каждого типа и получена следующая закономерность:

$$M_c(N_1, N_2) < M_d(N_1, N_2) < M_h(N_1, N_2).$$

Ісходя из приведенных графических зависимостей видно, что наилучшей масштабируемостью обладает иерархическая структура уровня управления.

Список литературы

1. Architecture SDN [Electronic resource] // Open Networking Foundation. – 2014. – Mode of access: <https://www.opennetworking.org/>
2. Software-Defined Networking: The New Norm for Networks [Electronic resource] // Open Networking Foundation. — 2012. — Mode of access: <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/white-papers/wp-sdn-newnorm.pdf>
3. Hyperflow: a distributed control plane for openflow / A. Tootoonchian and Y. Ganjali // Proceedings of the 2010 internet network management conference on Research on enterprise networking. USENIX Association, 2010/ – P. 3–13.
4. Onix: A distributed control platform for large-scale production networks / T. Koponen, M. Casado and other // OSDI. – Vol. 10, 2010. – P. 1–6.
5. OpenFlow Switch Specification (Series) [Electronic resource] // Open Networking Foundation. –2014. – Mode of access: <https://www.opennetworking.org/sdn-resources/onf-specifications/openflow>
6. Отчёт о НИР по теме : Создание прототипа отечественной ПКС платформы управления сетевыми ресурсами и потоками с помощью сетевой операционной системы (СОС) на основе анализа и оценки существующих сетевых операционных систем для ПКС сетей и выбора одной из них для последующего [Текст] – Москва : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2014.

Поступила в редколлегию 11.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Е.В Дуравкин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

АНАЛІЗ ТА ОЦІНКА МАСШТАБОВАНІСТЬ РІВНЯ УПРАВЛІННЯ МЕРЕЖ, ПОБУДОВАНИХ НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ SDN

О.Б. Ткачова, Ісаам Саад, Мохаммед Джамал Салім

У статті розглянуто особливості мережевої архітектури, побудованої на основі концепції Software-Defined Networking. Визначено основні характеристики рівня управління, які впливають на ефективність функціонування всієї мережі в цілому. Запропоновано метрику оцінки масштабованості рівня управління, а також розглянута масштабованість трьох основних структур рівня управління Software-Defined Networking: централізованої, децентралізованої, ієрархічної. Згідно запропонованим формалізмам зроблена оцінка часу відгуку для різних типів контролерів, а також масштабованість різних типів структур.

Ключові слова: Software-Defined Networking, масштабованість, рівень управління, час відгуку, контролер.

ANALYSIS AND EVALUATION CONTROL PLAN SCALABILITY FOR NETWORK BASED ON SDN CONCEPT

O.B. Tkachova, Issam Saad, Mohammed Jamal Salim

In the paper the features of network architecture that built on the concept of Software-Defined Networking are suggested. The main characteristics of control plane are determined. These characteristics affect to the efficiency of the entire network. The scalability metric of control plane are proposed, the scalability of the three main structures of control plan for Software-Defined Networking is consider. There are centralized, decentralized, hierarchical structures. In the formalism proposed assessed response times for different types of controllers, as well as scalability for various types of structures.

Keywords: Software-Defined Networking, scalability, control plane, response time, controller.